

**Opinia o rozprawie doktorskiej mgr Antoniny Tretyakowej  
dla Rady Wydziału Polsko-Japońskiej Akademii Technik Komputerowych**

**1. Zawartość rozprawy**

Przedstawiona mi do recenzji rozprawa doktorska mgr Antoniny Tretyakowej jest napisana w języku angielskim i nosi tytuł "Application of Nature Inspired Algorithms to Maximum Lifetime Coverage Problem in Wireless Sensor Networks", (co można przetłumaczyć na język polski jako Zastosowanie algorytmów inspirowanych naturą do problemu maksymalnego czasu życia pokrycia w bezprzewodowych sieciach sensorów). Rozprawa zawiera 210 stron i składa się ze Spisu treści, Listy rysunków, Listy tablic, Listy algorytmów, Listy skrótów, Listy oznaczeń, Podziękowań, Wprowadzenia, 8 podstawowych rozdziałów oraz Bibliografii zawierającej 121 pozycji.

We Wprowadzeniu Doktorantka podała krótki przegląd problemów związanych z eksploatacją sieci sensorowych, które sytuują tematykę rozprawy na tle innych zagadnień związanych z wydajnymi energetycznie protokołami dla takich sieci. Postawione w rozprawie zagadnienie dotyczy opracowania i zbadania algorytmów optymalizacji czasu obserwacji przez zadaną liczbę sensorów zadanego prostokątnego obszaru fizycznego. Obszar jest pokryty prostokątną siecią punktów zainteresowania, rozpiętą z tym samym krokiem w obu wymiarach. Punkty zainteresowania są obserwowane za pomocą bezprzewodowej sieci sensorów, przy spełnieniu szeregu założeń dotyczących cech sensorów oraz wymaganych cech pokrycia. Założenia dotyczące cech sensorów są następujące. Sensory są homogeniczne, mają zdolność wykrywania obcych ciał w swoim otoczeniu o kształcie koła o tym samym zadanym promieniu i przekazywania informacji o wykrytych intruzach do węzła nadrzędnego. Sensory obserwują punkty zainteresowania w tych samych dyskretnych punktach czasowych odległych od siebie o takie same interwały czasowe; wszystkie sensory są zasilane nietładowalnymi bateriami o tej samej początkowej pojemności  $b$ , sensory mogą być w danej chwili w jednym z dwu stanów – aktywnym kiedy są w stanie wykrywać intruzów i uśpionym, gdy są wyłączone i nie są w stanie tego robić. Obserwacja (stan aktywny sensora) zmniejsza pojemność baterii sensora w identycznym stopniu dla wszystkich sensorów. Wszystkie sensory zostają rozmieszczone w polu obserwacji w sposób losowy przed rozpoczęciem obserwacji. Założenia dotyczące wymaganych cech pokrycia zadanego obszaru obserwacji przez sensory są następujące: wymagane jest aby stopień pokrycia punktów zainteresowania w obszarze obserwacji w każdym interwale obserwacji wynosił conajmniej  $q$  czyli aby w danym interwale czasu obserwacji conajmniej określona część  $q$  liczby wszystkich punktów zainteresowania w obserwowanym obszarze była pokryta obserwacją przez aktywne sensory (z pewnym ustalonym odchyleniem tej wartości). Wymagane jest również aby energia zgromadzona w baterii każdego sensora została w pełni wykorzystana podczas optymalizacji, tzn. aby każdy sensor był w stanie aktywnym łącznie podczas  $b$  interwałów czasowych. Postawiony w pracy problem optymalizacyjny, nazywany **Maximum Lifetime Coverage Problem (MLCP)**, po polsku: **problem maksymalizacji czasu życia pokrycia**, jest następujący: dla podanych powyżej założeń, w tym dla początkowego przypadkowego rozkładu sensorów w polu obserwacji, należy znaleźć maksymalną liczbę kroków obserwacji z przełączeniami sensorów między stanami aktywnym i uśpionym, zapewniającą aby w każdym kolejnym interwale czasu tych kroków obserwacji nastąpiło spełnienie stopnia pokrycia punktów zainteresowania w wysokości conajmniej  $q$  oraz

wykorzystanie każdego sensora w stanie aktywnym w tej maksymalnej liczbie kroków obserwacji wynosiło łącznie  $b$ . Doktorantka sygnalizuje, że postawiony w pracy problem jest NP-trudny i stwierdza, że celem pracy jest zbudowanie inspirowanych naturą algorytmów rozwiązania postawionego problemu z wykorzystaniem dodatkowej wiedzy o problemie oraz porównanie opracowanych algorytmów z rozwiązaniami znanymi w literaturze. W tym zakresie Doktorantka przedstawia listę odnośników do ostatnio opublikowanych prac, w których przedstawiono przybliżone rozwiązania postawionego problemu.

W kolejnej części Wprowadzenia Doktorantka rozwija prezentację celów i zakresu rozprawy, dzieląc opracowane algorytmy na zcentralizowane oraz o lokalnym sterowaniu sensorów, przy czym wśród opracowanych metod wymienione są podejścia meta heurystyczne oraz heurystyki zachłanne z wbudowanym lokalnym przeszukiwaniem oraz algorytmy oparte na grafowych automatach komórkowych. Wymienione są ogólne cele częściowe rozprawy.

Dalsza część Wprowadzenia zawiera krótkie omówienie zawartości rozprawy z podziałem na Rozdziały. Omówienie rozdziałów rozprawy poprzedzone jest przedstawieniem zarysu ogólnego podejścia do metodyki realizacji badań i wykorzystywania w algorytmach wiedzy o problemie. Podejście to zawiera najpierw identyfikację podstawowych własności rozwiązań znanych w literaturze i wprowadzenie odpowiedniego aparatu pojęciowego dla podstaw algorytmów. Następnie opracowane zostały odpowiednie metody analizy danych wejściowych dla różnych poziomów oczekiwań co do jakości uzyskiwanych rozwiązań. Kolejnym krokiem jest opracowanie i implementacja samych algorytmów rozwiązywania problemu MLCP. Końcowy krok badań dotyczy analizy realizacji opracowanych algorytmów dla szerokiego zakresu badanych parametrów i porównanie algorytmów o najlepszych parametrach z najlepszymi algorytmami znanymi w dziedzinie prowadzonych badań.

Rozdział 2 przedstawia MLCP jako problem optymalizacji zużycia energii dla problemu maksymalnego czasu życia pokrycia sieci sensorów. Wprowadzone zostały podstawowe pojęcia dla problemu, pokrycie punktu przez sensor, pokrycie pola obserwacji przez sensory, czas życia bezprzewodowej sieci sensorów. Następnie sformułowany został problem maksymalizacji czasu życia pokrycia pola obserwacji MLCP. Opisano założony sposób reprezentacji i kodowania rozwiązań problemu MLCP jako macierzy prostokątnej podającej stany sensorów w kolejnych interwałach czasowych obserwacji zadanego pola, definicje parametrów wejściowych problemu, sposób oceny sekwencji stanów serwerów w czasie obserwacji (kategoryzacja kolumn, w zależności od stopnia pokrycia punktów zainteresowania, na klasę RS z redundancyjnym pokryciem punktów obserwacji gdzie są one pokryte nadmiarowo w stopniu większym niż  $q+\delta$ , klasę doskonałego pokrycia ES przy którym pokrycie jest w granicach  $q\pm\delta$  oraz klasę niezadowalającego pokrycia US, gdzie pokrycie jest mniejsze niż  $q-\delta$ ), gdzie  $q$  oraz  $\delta$  stanowią parametry problemu: stopień pokrycia obszaru obserwacji sensorami i jego dopuszczalnym odchyleniem. W rozdziale tym opisano szereg eksperymentalnie wykrytych własności problemu w funkcji jego parametrów. Kolejna część rozdziału opisuje stan wiedzy w dziedzinie algorytmów rozwiązujących problem MLCP. Omówiono tu znane literaturze algorytmy scentralizowane i niescentralizowane. Algorytmy scentralizowane obejmują mieszane podejście całkowito-liczbowe (mixed integer programming), programowanie liniowe z upakowaniami (packing linear programming), kolorowanie grafów (graph coloring methods), metodę analizy największych niepokrytych obszarów (largest uncovered area) i algorytmy aproksymacyjne (approximation algorithms). Algorytmy niescentralizowane podzielono na zachłanne, stochastyczne i oparte na innych technikach.

Rozdział 3 rozprawy jest poświęcony ogólnemu wprowadzeniu do algorytmów inspirowanych naturą. Omówiono w nim podstawy algorytmów przeszukiwania lokalnego, algorytmów symulowanego wyżarzania, algorytmów genetycznych oraz automatów komórkowych. Wśród

metod związanych z automatami komórkowymi omówiono podstawy dla Game of Life Conway'a i ich uogólnieniu dla automatów typu „life-like” oraz dla podejścia grafowych automatów komórkowych.

Rozdział 4 poświęcono przedstawieniu opracowanych przez Doktorantkę heurystyk zachłanych z lokalną optymalizacją dla rozwiązania problemu MLCP. Optymalizacja polega na usuwaniu redundancyjnego pokrywania punktów zainteresowania przez sensory. Jako pierwszy jest opisany prosty zachłany algorytm polegający na ulepszaniu, w zadanej liczbie kroków, najlepszego cząstkowego rozwiązania z wygenerowanego zbioru opartego na tzw. krytycznym punkcie zainteresowania tj. pokrytym przez największą liczbę sensorów. Drugi zaproponowany zaawansowany algorytm zachłany wykorzystuje analizę drzewa rozwiązań cząstkowych generowanych z wybranych elementów rozwiązania nie spełniających warunku dotyczącego  $q$ , z wykorzystaniem związanej z  $q$  klasyfikacji kolumn reprezentacji rozwiązania. Rozwiązania cząstkowe generowane są przez wykonywanie operacji OR oraz AND na wartościach w niezadowolających kolumnach rozwiązania a następnie są wykorzystane dla ulepszenia rozwiązania o ile poprawiają stopień pokrycia. Dla zmniejszenia nadmiarowego pokrycia w kolejnych iteracjach wybrane sensory w kolumnie RS zostają wyłączone w stanie aktywnym, aby zostać włączone w poprawionych kolumnach klasy US.

Końcowa część Rozdziału 4 podaje wyniki badań eksperymentalnych opracowanych algorytmów zachłanych. W części tej podano tabele liczbowe oraz wykresy obrazujące zachowanie się algorytmów w funkcji różnych wartości parametrów problemu. W szczególności wykresy potwierdzają stabilizację w kolejnych iteracjach zadanego stopnia pokrycia obszaru obserwacją sensorów dla wysokiego stopnia pokrycia  $q = 0.9$ , ilustrują stopień zależności jakości wyników działania algorytmów od wartości parametrów problemu MLCP oraz wykazują znacznie lepsze wyniki wykonania zaawansowanego algorytmu zachłanego w porównaniu z prostym.

Rozdział 5 rozprawy jest poświęcony badaniom nad zastosowaniem algorytmu symulowanego wyżarzania do rozwiązania problemu MLCP. W początkowej części rozdziału przedstawiono specyfikację algorytmu w zastosowaniu do problemu MLCP. Opisano założone podstawowe elementy strukturalne i funkcjonalne tego algorytmu takie jak: sposób generowania inicjalnego rozwiązania i rozwiązań sąsiednich, metoda ustalania temperatury początkowej, przyjęte schematy schładzania (liniowy, logarytmiczny i geometryczny z podgrzewaniem), warunki zakończenia schładzania (według zadanej liczby iteracji, według poziomu temperatury oraz przy braku poprawy rozwiązania dla danej liczby iteracji). Generowanie sąsiednich rozwiązań w kolejnych iteracjach algorytmu oparte jest na zamianie jednej lub więcej par przeciwstawnych wartości w jednym wierszu rozwiązania (stanów wybranego sensora w określonych interwałach czasu obserwacji). Zbadano przypadkowy i oparty na wiedzy o problemie wybór pary stanów do zmiany wartości. W tym drugim przypadku wyłączano aktywny sensor należący do kolumny nadmiarowej (RS) oraz włączano ten sensor w pierwszej napotkanej kolumnie niezadowolającej (US). Rozwiązanie lepsze pod względem analizowanego czasu życia pokrycia bezwarunkowo zastępowało bieżące rozwiązanie. Gorsze rozwiązanie mogło być zaakceptowane z prawdopodobieństwem eksponencjalnie zależnym od różnicy jakości obu rozpatrywanych rozwiązań w sensie czasu życia pokrycia oraz od bieżącej wartości temperatury wyżarzanego materiału. Dla przyjętych założeń podano dyskusję zależności między parametrami algorytmu popartą odpowiednimi wykresami. Dalsza część Rozdziału 5 przedstawia wyniki eksperymentalne uzyskane przy zastosowaniu opracowanych algorytmów symulowanego wyżarzania do problemu MLCP. Eksperymenty dostarczyły informacji na temat wpływu rozmiaru sąsiedztwa na czas życia sieci sensorów, wpływu gęstości rozłożenia sensorów w polu obserwacji na czas życia sieci, relacji między stopniem pokrycia punktów obserwacji i czasem życia sieci, wpływu przypadkowości rozłożenia sensorów na czas życia sieci oraz wpływu wartości pojemności baterii na czas życia sieci. Wykonano badania

porównawcze opracowanych algorytmów symulowanego wyżarzania, które wykazały, że najlepsze wyniki uzyskano dla algorytmu z sąsiednimi rozwiązaniami generowanymi przy przełączaniu jednej pary wartości stanów sensora i logarytmicznym schematem schładzania.

W Rozdziale 6 rozprawy przedstawiono wykonane badania nad zastosowaniem algorytmów genetycznych do rozwiązania problemu MLCP. W pierwszej części przedstawiono założenia dla opracowanych algorytmów. Populację początkową generuje się w taki sposób, aby w każdym wierszu występowało  $b$  stanów aktywnych sensora. W każdej iteracji wykonane są trzy operatory: selekcji, krzyżowania i mutacji. Dla operatora selekcji założono selekcję turniejową. Na parach przypadkowo wybranych indywiduów dokonane jest kolejno krzyżowanie i mutacja z wybranymi prawdopodobieństwami. Krzyżowanie jest wykonywane w jednej z trzech wersji: krzyżowanie jednopunktowe, krzyżowanie k-punktowe i krzyżowanie z wykorzystaniem wiedzy o problemie czyli klasyfikacji kolumn na typy RS, ES i US. Mutacja jest wykonywana w dwu wersjach: zwykła i mutacja wykorzystująca wiedzę o problemie. Zwykła mutacja polega na zamianie wartości dla pary przeciwstawnych stanów sensora w tym samym wierszu rozwiązania. Mutacja z użyciem wiedzy o problemie polega na wybraniu kolumny US, w której każdy stan uśpiony jest zamieniony na aktywny z założonym prawdopodobieństwem a dla każdej dokonanej zmiany przypadkowy stan aktywny w tym samym wierszu jest zmieniony na uśpiony. Po mutacji, jest użyta strategia elitarna do wybrania rozwiązań dla następnej generacji algorytmu przy funkcji dopasowania stanowiącej czas życia pokrycia.

Druga część Rozdziału 6 opisuje wyniki badań eksperymentalnych dla algorytmów genetycznych. Dla wstępnego zbadania efektów obu typów mutacji, wykonano najpierw eksperymenty dla oceny algorytmu z jedną instancją problemu dla  $q = 0.9$  i jednego zestawu parametrów, przy braku fazy krzyżowania, trzema typami dwuelementowej populacji początkowej (całkowicie przypadkowej, przypadkowej w części  $n$ , gdzie  $n$  indywiduów jest przypadkowych a reszta jedynekowych oraz całkowicie jedynekowej), dla zadanego szeregu wartości prawdopodobieństw mutacji. Wykresy dla prostej mutacji do 1000 generacji pokazują uzyskane bardzo niskie czasy życia pokrycia (conajwyżej 10) przy braku czułości na zadane prawdopodobieństwa mutacji. Wykresy dla mutacji uwzględniającej wiedzę o problemie przedstawione jako następne wykazują dużą poprawę uzyskanych wyników. Algorytmy reagują na zwiększanie wartości prawdopodobieństwa mutacji osiągając dla wartości 0.4 oraz liczby generacji powyżej 1000 czasy życia pokrycia od 30 do 36. Rodzaj populacji początkowej wpływa na wartość osiąganą funkcji dopasowania dla najniższego prawdopodobieństwa mutacji – od 0 dla populacji przypadkowej do 10 dla populacji złożonej z samych jedynek. W kolejnej części Rozdziału 6 zbadano wpływ założonych metod krzyżowania na uzyskiwane czasy życia pokrycia dla  $q = 0.9$ . Algorytm z pojedynczym miejscem krzyżowania silnie reaguje na liczbę generacji do 400 (czas życia zmienia się od 10 do 30) po czym krzywa czasu życia nasycy się dla 1000 generacji osiągając wartość czasu życia 30 – 32. Algorytm słabo reaguje na prawdopodobieństwo krzyżowania (zmiany w zakresie 0.3 do 0.9 powodują różnice czasu życia w zakresie do 5). Dla wariantów algorytmu z wieloma miejscami krzyżowania (do 5 miejsc) zachowanie czasu życia pokrycia w funkcji liczby miejsc krzyżowania i liczby generacji dla prawdopodobieństwa 0.3 jest podobne do tego dla jednego miejsca, z tym że najlepsze wyniki są gorsze o około 5. Dla algorytmu z wykorzystywaniem wiedzy o problemie i algorytmu z jednym miejscem krzyżowania wpływ prawdopodobieństwa krzyżowania (w zakresie od 0.1 do 0.9) i liczby generacji jest podobny – krzywe nasycają się powyżej 200 generacji osiągając w pierwszym przypadku czas życia pokrycia do 33 a w drugim - do 35. Wpływ rodzaju populacji początkowej jest stosunkowo nieznaczny (krzywe nasycają się uzyskując nasycenie 28-35 dla 1-punktowego krzyżowania oraz 25-36 dla algorytmu z użyciem wiedzy o problemie).

W rozdziale 7 przedstawiono w postaci tabel wyniki analizy porównawczej 3 scentralizowanych typów algorytmów: zachłannego, symulowanego wyżarzania i genetycznego dla najlepszych parametrów tych algorytmów określonych w badaniach opisanych w poprzednich rozdziałach. Eksperymenty opisane w tym rozdziale wykonano dla 9 wybranych instancji problemu, ustalonego  $b = 10$ ,  $q$  zmieniającego się od 0.75 do 0.95 oraz dwu wartości promienia obserwacji sensora  $R_s$ : 10 i 20. Algorytm zachłanny wykonano dla 150 iteracji z przypadkową inicjalizacją i analizą drzewa rozwiązań generowanego z użyciem funkcji boolowskich AND i OR na stanach sensorów. Algorytm symulowanego wyżarzania wykonano z generowaniem pojedynczych rozwiązań z sąsiedztwa oraz wykorzystaniem wiedzy o problemie (klasyfikacji kolumn rozwiązania) dla zadanej liczby iteracji lub do osiągnięcia temperatury zamrażania. Algorytm genetyczny wykonano dla 1000 generacji z turniejową selekcją populacji 50 osobników, 1-punktowym krzyżowaniem i mutacją z wykorzystaniem wiedzy o problemie, wykonywanych odpowiednio z prawdopodobieństwami 0.7 i 0.2. Wynikiem jest maksymalny i średni czas życia pokrycia. Algorytmy zachłanne i symulowanego wyżarzania zachowują się z dużym przybliżeniem podobnie i dają zdecydowanie lepsze wyniki (około 15 % do 30% dłuższe czasy życia niż algorytmy genetyczne). Stwierdzono, że dla wszystkich 3 typów algorytmów decydujące znaczenie ma promień obszaru obserwacji sensora. Zwiększenie dwukrotne tego parametru daje trzy- i czterokrotne zwiększenie czasu życia pokrycia, zależnie od typu algorytmu. Badane algorytmy stosunkowo łatwo dają zadawalające wyniki dla stopnia pokrycia  $q$  do 0.9, dając duże wartości czasu życia pokrycia. Dla  $q = 0.95$  osiągnięty stopień pokrycia spada o 25-30 %.

Rozdział 8 rozprawy jest poświęcony zastosowaniu podejścia rozproszonych grafowych automatów komórkowych do rozwiązywania problemu MLCP. Pierwsza część rozdziału jest poświęcona omówieniu cech zastosowanego podejścia zakładającego wykorzystanie przez automat komórkowy grafu reprezentującego relację pokrywania wspólnych punktów zainteresowania (obserwacji) przez pary sensorów umieszczonych w polu obserwacji. Węzłami grafu są więc sensory stanowiące komórki automatu a każda krawędź odpowiada pokryciu punktu obserwacji wspólnie przez dwa sensory, które w takim przypadku nazywa się sąsiednimi. Grafy mogą odpowiadać regularnym i nieregularnym strukturom wspólnego pokrycia. Stan komórki sensora ma trzy wartości: aktywny, uśpiony, martwy. W czasie działania grafowego automatu komórkowego komórki zmieniają swoje stany zgodnie z regułami stanowiącymi uogólnione funkcje przejścia między stanami komórek (narodziny - Birth, przetrwanie - Surviving, umieranie - Dying), symulujące życie osobników w populacjach, znane w literaturze jako reguły życia („life-like”). Reguły te biorą pod uwagę aktualny stan wszystkich sąsiadów danej komórki w grafie oraz stan baterii i określają przejście danej komórki do następnego stanu. Uogólnienie polega na wprowadzeniu do reguł przejścia między stanami, zmiennych określających zakresy liczb sąsiednich komórek znajdujących się w danych stanach stanowiących warunki dla określonych przejść między stanami. Zakresy te są określane przez pary granicznych wartości, przy czym Doktorantka skupia swoją uwagę przede wszystkim na złożonych regułach zapewniających narodziny albo przetrwanie – oznaczanych przez  $Br_{3r_4}/Sr_{1r_2}$ , gdzie B oznacza narodziny, S oznacza przetrwanie a  $r_1, r_2, r_3, r_4$  to ograniczniki przedziałów liczby stanów sąsiadów odpowiedniego rodzaju. Oprócz reguł typu „life-like” z parami zmiennych dla określenia warunku przejścia, wprowadzono również regułę zwaną regułą R (R-rule), która ustala liczbę całkowitą R jako próg dla znalezienia się komórki sensora w następnym interwale czasu w stanie aktywnym – komórka będzie w następnym interwale czasu w stanie aktywnym jeśli nie więcej niż R sąsiednich komórek jest aktywnych i bateria jest niepusta, w przeciwnym razie komórka przechodzi do stanu uśpienia.

Algorytm składa się z dwu faz: fazy konfiguracyjnej oraz fazy wykonawczej. W tej pierwszej fazie jest rozpoznana lista sąsiadów każdej komórki. W drugiej fazie następuje wyznaczenie i wprowadzenie następnego stanu komórki oraz rozpowszechnienie informacji o nim wśród sąsiadów, a następnie odbieranie komunikatów o stanach od sąsiadów.

Dla rozwiązania problemu MLCP zbadano dwie wersje schematu zmiany stanów komórek: jednoczesny dla wszystkich oraz szeregowy według numerów komórek. W stanie inicjalnym algorytmu wszystkie komórki sensorów są ustawiane w stanie aktywnym albo uśpionym. Wszystkie sensory mają zsynchronizowane zegary i znają swoje położenie we wspólnym układzie współrzędnych prostokątnych.

Druga część Rozdziału 8 poświęcona jest wyborowi parametrów dla zastosowania grafowego algorytmu komórkowego do rozwiązania problemu MLCP. Stwierdzono, że w grafach generowanych dla instancji dużych sieci sensorowych dla dużych wartości promienia obserwacji sensorów i małych odległości między punktami zainteresowania mogą występować duże wartości stopnia wężła w grafowych automatach komórkowych. Na podstawie analizy możliwych relacji między wartościami zmiennych  $R$ ,  $r_1$ ,  $r_2$ ,  $r_3$ ,  $r_4$  wybrano 5 wariantów reguł dla eksperymentalnego przebadania podanych komórkowych algorytmów rozwiązania problemu MLCP z inicjalizacją części  $p$  z wszystkich komórek do stanu aktywnego, gdzie  $p = 0,25$  i  $0,75$ . Na końcu tej części podano wykresy obrazujące dynamikę działania grafowych algorytmów komórkowych w zakresie do 200 interwałów czasu z jednoczesnym uaktualnianiem stanów dla wybranej instancji sieci sensorów z wartościami  $R_s=20$  i  $b=20$ , i inicjalnego przypadkowego rozkładu sensorów z zawartością aktywnych sensorów na poziomie 0.25 oraz 0.75. Na wykresach podano przebieg stopnia pokrycia, liczbę aktywnych sensorów i liczbę sensorów z niewyładowanymi bateriami w funkcji czasu eksperymentu przy stosowaniu różnych wariantów reguły  $Br_{3r_4}/Sr_{1r_2}$  i reguły  $R$ . Podane wykresy pokazują, dla jakich wariantów reguł jest możliwe uzyskanie wysokiego stopnia pokrycia pola obserwacji przez długie okresy czasu. Możliwe było też utrzymanie bardzo wysokiego stopnia pokrycia (0.95) przez krótki okres (20 interwałów) po czym pokrycie drastycznie spadało do 0.5-0.6 głównie z powodu wyczerpywania się baterii.

W kolejnej części Rozdziału 8 podano wyniki eksperymentów z szeregowym uaktualnianiem stanu sensorów przy wykorzystaniu 4 wariantów  $R$ -reguł, inicjalnego rozkładu aktywnych sensorów od 0 do 100%, 3 wariantów pojemności baterii  $b$ . Wyniki przedstawiono w postaci tabeli. Dla stopnia pokrycia 0.9 wykryto wartości  $R$  zapewniające najlepsze wyniki. Inicjalny rozkład aktywnych sensorów dla tych  $R$  miał słaby wpływ. Kolejne eksperymenty badały wpływ wartości  $R$  na przebieg wykonania algorytmu dla homogenicznego grafu w algorytmie komórkowym. Badanie stopnia pokrycia w funkcji czasu z parametrem  $R$  z pewnego zakresu wykazały, że sieci komórkowe w zakresie krótszych czasów działania wykorzystują najlepiej reguły z wysokim  $R$  aby przejść do reguł z niższym  $R$  po dłuższym czasie działania. Badanie czasu życia pokrycia w funkcji  $q$  z parametrem  $R$  wykazały, że sieci komórkowe mają dłuższy czas pokrycia dla niższego  $q$  oraz  $R$ . Badania czasu pokrycia w funkcji wartości  $R$  w użytej  $R$ -regule z parametrem równym założonej wartości  $q$  wykazały, że dla małych rosnących  $R$  czas życia pokrycia dla  $q$  początkowo silnie rośnie a potem dla większych rosnących  $R$  stopniowo opada. Jako ostatnie w tym rozdziale opisano badania wpływu rodzaju zastosowanej reguły życia typu  $Br_{3r_4}/Sr_{1r_2}$  na przebieg wykonania grafowych algorytmów komórkowych dla problemu MLCP. Pokazano przestrzenno-czasowy wykres stanów sensorów pokrywających monitorowany obszar przy wykonaniu algorytmu dla reguły typu  $Br_{3r_4}/Sr_{1r_2}$  przy inicjalizacji wszystkich sensorów stanem aktywnym. Następnie zamieszczono wykres przebiegu pokrycia obserwowanego obszaru w funkcji czasu wykonania algorytmu oraz zmiany w czasie liczby sensorów aktywnych i sensorów z niewyczerpanymi bateriami. Jako ostatni pokazano wykres stopnia pokrycia punktów obserwacji sensorami w czasie dla algorytmu opierającego się o wykorzystanie pięciu wybranych reguł typu  $Br_{3r_4}/Sr_{1r_2}$ , przy  $q=0.9$ . Wykryto, że sieć sensorów zachowuje dłuższy czas życia pokrycia obserwowanego obszaru dla niższych wartości  $r_3$  ale również przy niższym osiąganym stopniu pokrycia (z zakresu 0-0.4).

Rozdział 9 zawiera wnioski wynikające z opracowanej rozprawy.

## **2. Opinia merytoryczna**

### **Poprawność i oryginalność postawionej tezy**

Doktorantka nie sformułowała explicite tezy pracy. Natomiast wymieniła cele rozprawy, które można uznać za podstawę dla określenia problemów, które mają być w rozprawie rozwiązane.

Cele pracy w moim tłumaczeniu w odniesieniu do algorytmów scentralizowanych są następujące:

1. Opracowanie i implementacja zachłannego algorytmu dla rozwiązania problemu MLCP.
2. Opracowanie i implementacja algorytmu symulowanego wyzarcia dla rozwiązania problemu MLCP.
3. Opracowanie i implementacja algorytmu genetycznego wykorzystującego wiedzę o problemie dla rozwiązania problemu MLCP.
4. Weryfikacja eksperymentalna wydajności algorytmów dla zbioru instancji sieci sensorowej o różnych gęstościach.

W szczególności dla podejścia z lokalnym sterowaniem sensorami wymienione są dwa następujące cele cząstkowe:

1. Opracowanie i implementacja algorytmu opartego na grafowych automatach komórkowych dla rozwiązania problemu MLCP.
2. Weryfikacja eksperymentalna wydajności algorytmów wykorzystujących grafowe automaty komórkowe dla różnych reguł aktualizacji stanów.

Podane cele pracy nie są sformułowane zbyt precyzyjnie, w sposób ułatwiający ocenę pracy w świetle wymagań ustawy. Oryginalność założonych celów staje się bardziej jasna dopiero po dalszych wyjaśnieniach podanych na wstępie do rozdziału 2 oraz w podrozdziałach 2.1 i 2.2, że będą to rozwiązania stanowiące uogólnienie rozwiązań znanych w literaturze i zastosowaniu modelu problemu zbliżonego do tego, który stosowany jest w technice szeregowania zadań i uwzględnieniu w opracowanych algorytmach wiedzy o problemie poprzez specyfikację jakości obserwacji zadanego obszaru dwuwymiarowej przestrzeni przez sensory z ograniczeniami pojemności baterii i zakresu pokrywania celów zainteresowania. O cechach zastosowanych podejść Doktorantka pisze dopiero w odpowiednich rozdziałach związanych z opracowanymi algorytmami. Powinny one być natomiast dokładniej omówione w celach i założeniach rozprawy. Na podstawie podanych informacji i wskazanej literatury problemu można stwierdzić, że zestaw celów osiągniętych w rozprawie jest oryginalny.

### **Ocena merytoryczna wyników uzyskanych w rozprawie**

Rozprawa ma charakter praktyczny. Stosując nomenklaturę ustawy, można ją zaklasyfikować jako pracę projektową z dziedziny metodologii optymalizacji rozwiązania istotnego zagadnienia techniki jakim jest monitorowanie prostokątnego obszaru zainteresowania przez bezprzewodową sieć sensorów z wykorzystaniem podejścia inspirowanych naturą algorytmów równoległych.

Na podstawie przedstawionych opisów opracowanych algorytmów jak również przeprowadzonych badań eksperymentalnych można stwierdzić, że postawione cele rozprawy zostały osiągnięte. W zakresie realizacji tych celów Doktorantka wykorzystwała istniejącą wiedzę na temat algorytmów optymalizacji sterowanych naturą dodając własne rozwiązania koncepcyjne i implementacyjne. W ten sposób rozszerzyła stan wiedzy w dziedzinie metod optymalizacji w postawionym w rozprawie zagadnieniu. Należy tu podkreślić przede wszystkim wymienione poniżej wyniki.

1. Macierzowy sposób zamodelowania rozwiązania w problemie MLCP z uwzględnieniem jakości harmonogramów pokrycia obszaru obserwacji przez sensory.
2. Zbadanie własności problemu MLCP poprzez rozległe eksperymenty analizujące dla 9 testowych instancji problemu wpływ zakładanych parametrów na czas życia pokrycia.
3. Opracowanie dla MLCP i zbadanie dwu heurystycznych algorytmów zachłannych z różnymi metodami inicjalizacji algorytmów i generowania rozwiązań cząstkowych.

4. Opracowanie dla MLCP i zbadanie dwu wersji algorytmów symulowanego wyżarzania z przypadkowym i opartym na wiedzy o problemie sposobem generowania rozwiązań cząstkowych.
5. Opracowanie dla MLCP i zbadanie dwu wielowariantowych wersji algorytmów genetycznych wykorzystujących wiedzę o problemie.
6. Wykonanie badań porównawczych najlepszych wariantów trzech opracowanych typów algorytmów ze sterowaniem scentralizowanym: algorytmów zachłannych, symulowanego wyżarzania i genetycznych.
7. Opracowanie dla MLCP i zbadanie algorytmów wykorzystujących podejście grafowych automatów komórkowych.

Uzyskane wyniki rozprawy w tym opracowane algorytmy i wykonane badania eksperymentalne są obszerne, wartościowe i ciekawe. W szczególności badania eksperymentalne pokrywają szeroki zakres wariantów parametrów opracowanych algorytmów. Pewien niedosyt budzi brak porównania wyników algorytmów wykorzystujących podejście grafowych automatów komórkowych z algorytmami scentralizowanymi.

Przechodząc do podsumowania oceny opiniowanej rozprawy stwierdzam, że dotyczy ona bardzo aktualnego i ciekawego problemu badawczego oraz że opracowane i zbadane w rozprawie metody rozwiązywania problemów optymalizacji z dziedziny bezprzewodowych sieci sensorowych są istotne dla rozwoju metodologii tej dziedziny i praktyki. O znaczeniu przeprowadzonych prac i uzyskanych wyników świadczy fakt, że wyniki dotyczące rozprawy zostały przedstawione w wielu publikacjach konferencyjnych i jednym czasopiśmie o zasięgu międzynarodowym.

Pomijając wady redakcji opisów algorytmów i wyników eksperymentów, niniejsza rozprawa stanowi bardzo użyteczne opracowanie dla techniki realizacji i optymalizacji bezprzewodowych sieci sensorowych. Dlatego po stosownych poprawkach rozprawa powinna być opublikowana w szerszej postaci niż artykuły konferencyjne.

### **Analiza źródeł i wiedza autora w danej dyscyplinie naukowej**

Niniejsza rozprawa doktorska świadczy o bardzo dobrej wiedzy Doktorantki w zakresie wykorzystanych sterowanych naturą metod optymalizacji. Cytowana i wykorzystana literatura uwzględnia moim zdaniem podstawowe problemy cząstkowe dziedziny pracy, aczkolwiek przydałyby się dokładniejsze opisy metod znanych w literaturze rozwiązań odnoszących się do problemu MLCP, po które trzeba było dopiero sięgać do źródeł. Utrudniało to ocenę oryginalności uzyskanych w rozprawie wyników.

### **Uwagi szczegółowe**

Na podkreślenie zasługuje opracowanie oraz wykonanie w ramach rozprawy szeroko zaplanowanych eksperymentów w czterech różnych dziedzinach metod optymalizacji. Niestety w niektórych miejscach tekstu pozostawiono usterki opisu opracowanych metod i wyników, co dotyczy precyzji wystawiania się w języku angielskim, nieoptymalnego oznaczania wielkości, pewnych błędów lub niejasności w definicjach. Sprawiało to, że miejscami czytanie rozprawy było utrudnione.

Przytaczam ważniejsze zauważone usterki:

1. Definition 2: str. 9  
„Coverage of a target field.....is defined as a ratio of observed  $POIs_{obs}$  .... to all  $POIs$ .” powinno być „Coverage of a target field.....is defined as a ratio of the numer of observed  $POIs_{obs}$  .... to the numer of all  $POIs$ .”
2. Na str. 8, w zdaniu „ Let us denote the mode of j-th sensor during i-th time interval as *state* ( $s_j,i$ ), where *state* ( $s_j,i$ )  $\in$  {ON, OFF}.” lepiej byłoby napisać „....where *state* ( $s_j,i$ )  $\in$  {1, 0}”.

unikając nadmiernego mnożenia oznaczeń. A jeszcze lepiej byłoby w tym miejscu zrezygnować ze słowa „mode” ograniczając się w jedynie do pojęcia stanu (state) sensora, o wartościach ze zbioru {active, sleeping}, mówiąc dalej, że stany „active, sleeping” będą kodowane jako 1, 0, odpowiednio, jak to zresztą napisano na stronie 12.

3. Na str. 10, w zdaniu „MLC has an objective...by minimizing a numer of redundant sensors...” użyto pojęcie „redundant sensors”, które zostało zdefiniowane dopiero na str. 11.
4. Wzór (2.3) jest niepoprawny: wskaźnik  $i$  po znaku  $\Sigma$  powinien być zastąpiony przez funkcję zmiennej  $i$  przyjmującą wartość 1 gdy  $cov(i) \geq q$  albo wartość 0 w pozostałym przypadku; wielkość  $T_{max}$  została użyta zanim została zdefiniowana (definicja jest podana 2 strony później); wzór powinien uwzględniać wymaganie co do wartości pojemności baterii, niepotrzebny jest nawias}.
5. Na str. 11, „states of activity” powinno być zastąpione przez „states”.
6. Na str. 12, „ $T_{max} \times N$ ” powinno być zamienione na „ $N \times T_{max}$ ”.
7. Na str. 12, w zdaniu „A column of the schedule contains a network of active sensors during the certain time interval”, słowo „network” powinno być zamienione na „a representation of active and sleeping sensors in the network” a jeszcze lepiej byłoby na: „a representation of sensor states in the network”, zgodnie z definicją reprezentacji rozwiązania.
8. Na str. 13, przy określeniu zapisu harmonogramu w macierzowej reprezentacji rozwiązania problemu, używano różnych określeń: w tytule rozdziału 2.2.3 użyto słowa „Subsequences”, w podpisie pod Rys. 2.2 użyto „sequence”. Nie jest formalnie wyjaśniona semantyka pojęcia sequence: domyślnie jest to uszeregowanie stanów sensorów, spełniające wymaganie na pokrycie w stopniu  $q$  w czasie od  $t1$  do  $T_{max}$ . Subsequence grupuje interwały czasowe o określonych podobnych stopniach pokrycia. Z tekstu rozprawy wynika, że „sequence” zawiera podsekwencje (subsequences) grupujące interwały czasu rozwiązania, które należą do tej samej klasy ze względu na stopień pokrycia punktów obserwacji przez sensory. W powszechnym użyciu, nazwa „subsequence” odpowiada sekwencji kolejnych elementów sekwencji (analogicznie do podciągu), podczas gdy jak zrozumiałem w rozprawie jest to zbiór niekoniecznie kolejnych interwałów czasowych (kolumn w rozwiązaniu). Lepsza byłaby chyba nazwa wykorzystująca pojęcie podzbioru interwałów czasowych - „the subset of time intervals”.
9. Wzór (2.7) na str. 13 jest niekompletny.
10. Zamieszczone na stronie 18 w punkcie „Battery capacity” zdania 1 i 3 nie mają zastosowania, gdyż pojemność baterii  $B$  i długość interwału czasowego są ustalone.
11. Na str. 19, słowna definicja związana z wzorem (2.15) zawiera niezdefiniowane pojęcie obszaru pokrycia – „coverage area”. Wzór (2.15) jest niepoprawny co najmniej dlatego, że lewa strona jest liczbą naturalną a prawa strona liczbą rzeczywistą.
12. Na str. 25 w nagłówku Tabeli 2.2 słowo „percentage” powinno być zastąpione słowem „fraction”.
13. Należy wyjaśnić skrót GA na str. 37.
14. W pseudokodzie szeregu algorytmów występuje zwiększanie wartości indeksów rządzących wyrażeniami typu *For* wewnątrz zawartego w nich kodu, patrz Algorytmy 3.1, 3.2, 4.1, 4.2, 5.1, 5.2, 6.1. Należy usunąć odpowiadające za to linie kodu albo zrezygnować z instrukcji *For* na rzecz *goto* z badaniem warunku wyjścia z pętli.
15. W Algorytmie 4.4,  $N_R$  powinno być zastąpione przez  $n_I$ .
16. W Algorytmie 5.1 należy poprawić wiersz 11, podobnie jak wiersz 15 w Algorytmie 5.2.
17. Na str. 100 występuje odwołanie do nieistniejącej Sekcji III.A.
18. Na str. 103 występuje niezdefiniowany termin: „REU classification of schedule”.
19. W opisie problemu MCLP w Rozdziale 2 na str. 8 sensor ma zdefiniowane 2 stany– „ON” oraz „OFF”. Odpowiadają temu tryby działania „active” and „sleeping”. Nie jest wyróżniony stan „exhausted” czyli martwy, odpowiadający stanowi sensora z wyczerpaną baterią. W Rozdziale

8, dotyczącym podejścia z grafowymi automatami komórkowymi, na str. 132 wprowadzono opis formalny problemu MLC w którym występują 3 stany sensora „0, 1, 2” odpowiadające trybom „active”, „sleeping” oraz „dead”.

Pytania dyskusyjne: czy w ogólnym sformułowaniu problemu MCLP nie powinien występować ten trzeci stan dla w pełni formalnego opisu redukowania się liczby działających sensorów w wyniku zużywania się baterii, oraz, czy nie lepiej byłoby przedstawić wszystkie opracowane algorytmy i je przedyskutować dla takiego bardziej ogólnego sformułowania MLCP.

Praca jest napisana w olbrzymiej większości poprawnym i zrozumiałym językiem, jednakże pozostawiono w niej liczne błędy językowe i pisarskie, z których wymienię przykładowo:

Str. 4,

„...the author will examine... and derived some properties...” powinno być „...the author will examine... and derive some properties...”

„...the algorithms will studied...” powinno być „...the algorithms will be studied...”

Str. 8,

„...generalization of MSC problem.” powinno być „...generalization of the MSC problem.”

„...uniformly divided on points...” powinno być „...uniformly divided into points...”

Str. 20,

„...is value defined by...” powinno być „...is the value defined by...”.

Zauważone niedociągnięcia opisów i definicji oraz błędy językowe nie eliminują wartości merytorycznej wyników przedstawionych w rozprawie ale utrudniają ich percepcję.

### **Wniosek końcowy**

Podsumowując niniejszą recenzję stwierdzam, że mgr. Antonina Tretyakova uzyskała w swojej rozprawie wyniki merytoryczne spełniające wymagania dla rozpraw doktorskich określone w obowiązującej ustawie o stopniach i tytule naukowym. Jednocześnie Doktorantka wykazała się znajomością dziedziny naukowej, której dotyczy rozprawa. Przeprowadziła rozległe badania naukowe opracowanych przez siebie rozwiązań. W związku z powyższym wnoszę o dopuszczenie recenzowanej rozprawy doktorskiej i mgr. Antoniny Tretyakovej do dalszych faz przewodu doktorskiego.